

高強度覆工コンクリートの品質管理の検討

A STUDY ON THE QUALITY CONTROL OF THE TUNNEL HIGH-STRENGTH CONCRETE LINING

海瀬 忍¹⁾・城間 博通²⁾・三谷 浩二³⁾

Shinobu KAISE, Hiromichi SHIROMA and Koji MITANI

In the construction of tunnels with a large and flat cross section on the New Tomei-Meishin Expressways, high-strength concrete is considered to be an expected material for the secondary lining in order to achieve cost reduction by reducing both thickness of the lining and excavation area. For the purpose of finding important points in casting the high-strength concrete and its strength characteristics with various conditions of casting and mix proportion, we performed testing by using model forms which simulate the real tunnel lining form and did the test construction in the field.

Key Words: The New Tomei Meishin Expressway, High-strength concrete, Quality control, Concrete lining tunnel

1. はじめに

第二東名・名神高速道路では、掘削断面積が 200m² 近い大断面トンネルが計画・施工されている。これらのトンネルは、単に断面が大きいだけでなく、断面形状が二車線断面に比べ扁平であるため、従来の二車線トンネルでの覆工の設計・施工の考え方だけでは施工性・経済性の向上を図ることが難しい。よって、従来の設計手法にもとづく設計厚さと掘削量をコンクリートの強度を上げることで低減させ、コストを削減する目的で設計基準強度 30N/mm² の高強度覆工コンクリートの断面トンネルへの適用を計画した。

2. 試験の目的

高強度覆工コンクリートの適用に当たり、道路トンネルにおける覆工の設置目的について考えてみると表-1¹⁾のような機能を有していると考えられる。

特に、力学的な機能はもちろん、不確定要素に関する機能に関しても、外力の作用する可能性がある。そのため、施工性が悪く覆工背面に空洞ができ、局部的な曲げ応力等が発生したりして、覆工の耐久性

表-1 覆工の機能

覆工の機能	概 要	備 考
供用性に関する機能	内空断面の保持機能	道路として必要な内空断面を確保する。
	防水機能	高い防水性を確保することで、漏水落下による視野障害、路面の摩擦抵抗の急激な変化、寒冷地におけるつらら・結氷・路面凍結・側壁の汚れによる快適性の低下、坑内諸設備の絶縁不良・腐食などを予防する。
	耐火機能	火災中の高温による地山や支保の著しい損傷を防ぎ、トンネル崩壊を起こさない。また、火災終了後にわずかな補修補強によって再使用できる。
	保守管理機能	覆工表面を目視観察しやすく保つことで、供用中のトンネル管状の劣化を早期に見出す。
	内装機能	覆工面を滑らかし視認性を高く保つことで、前方の障害物に視認性向上、心理的圧迫感の軽減を図る。また、換気においては、通気抵抗を小さく抑え効率を上げる。
	トンネル内施設の保持機能	照明・換気・非常用など諸設備、およびこれらを機能させるための電力・信号ケーブル類の取り付け性を確保する。
不確定要素に関する機能	余力保持機能	支保品質の不均一性や経時劣化、地山の経時劣化や緩み、あるいは異常降雨に起因する水圧の上昇など将来の不確定な理由により覆工に追加する荷重が作用することを想定して、想定荷重に耐えうる余力を保持する。
	変形性能保持機能	破壊に至るまでの変形が大きく、覆工構造の崩壊が一気に進展しない。
力学的な機能	付加外力の支持機能	覆工施工後の水圧の回復、切土・双設トンネル・近接施工などの予め確定している理由により土圧が変化し、付加外力が作用する場合に、これを支持する。
	支保工の補完機能	トンネルの変形が収束しない状態で覆工を施工し、支保工に追加してトンネルの安定に必要な拘束力を与える。

- 1) 正会員 日本道路公団 試験研究所 道路技術部 トンネル研究室
- 2) 正会員 日本道路公団 試験研究所 道路技術部 トンネル研究室 室長
- 3) 正会員 日本道路公団 九州支社 八代工事事務所 加久藤工事区 工事長

等に問題が生じ各機能を損なう可能性があり、コンクリートの品質および施工の管理が非常に重要となる。

したがってここでは、トンネルセントルの模擬型わくを使用して、コンクリート配合及び、圧力注入の有無による施工状況の違いからくる強度特性及び充填状況等の違いを把握するのを目的として、打設実験を実施し、その結果から、第二東名の清水第三トンネル工事において高強度覆工コンクリートの試験施工を実施し施工性と品質の確認を行ったので報告する。

3. 模擬型わく試験の概要

3. 1 試験の方法

本試験を行うに当たりセントルの模擬型わくを製作し、実際の施工と同じようにコンクリートを打設し試験を行った。また、天端部の型わく上面の注入側、中央部及び流出側の3個所に圧力センサーを設置し打設時の圧力を測定するとともに打設ポンプによる圧力管理（試験条件 50kPa）を実施した。試験ケースとその内容を表-2に示す。

表-2 試験ケース

試験 ケース	供 試 体 の種類	コンクリート の種類	粗骨材 最大寸 法(mm)	スランブ (cm)	型枠内 圧 力 (kPa)	締 固 め の有無
①	側壁部	通常コンクリート	40	15	-	有
②		高強度コンクリート	20			
③		鋼繊維補強 高強度コンクリート				
④	天端部	通常コンクリート	40	15	-	無
⑤			20		50	
⑥		-				
⑦		20	15	-		
⑧				50		
⑨			-			
⑩			20	50		
⑪				50		
		鋼繊維補強 高強度コンクリート				

3. 2 試験結果

打設時の型わく内圧力測定結果と打設状況より、天端部供試体の通常コンクリート (Gmax=40mm) は、注入圧の有無に係わらず打設が困難な状況となり、型わく内の圧力伝達も悪く大きな圧力差が生じた。

材齢 28 日の現場養生供試体とコアの圧縮強度を比較したコア圧縮強度比（図-1）より通常コンクリート (Gmax=40mm) の天端部コア供試体の圧縮強度比は注入圧の有る方が小さい結果となった。これは型わく内の圧力が管理出来ず圧力が一定でないために充填状況が悪くコア採取位置により強度の変動が大きいが原因であると考えられる。高強度コンクリートの天端部コア供試体の圧縮強度比は、スランブ=15cm の場合で注入圧の有るもので+11.1%、無いもので-1.5%，スランブ=20cm の場合で注入圧の有るもので+14.7%、無いもので-4.0%であり、注入圧の効果が認められた。この結果、単位セメント量の違いはあるが骨材の最大寸法が 20 mm では圧力管理が可能であり、圧力管理が出来れば締固めたものと同等以上の強度が得られることが確認された。

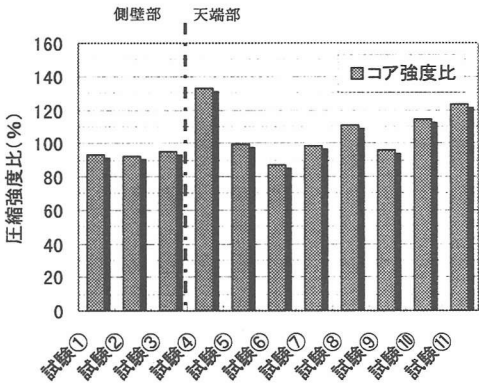


図-1 コア圧縮強度比

4. 清水第三トンネル工事における試験施工

4. 1 試験施工の概要

模擬型わくを使用した試験結果から、高強度覆工コンクリートの現場での使用は可能であると判断されたので、第二東名の清水第三トンネル工事において高強度覆工コンクリートの試験施工を行った。図-2 に清水第三トンネルで使用しているセントルの写真を示す。試験施工は、通常的设计厚さ (t=50 cm) で高強度覆工コンクリートを 5 ス

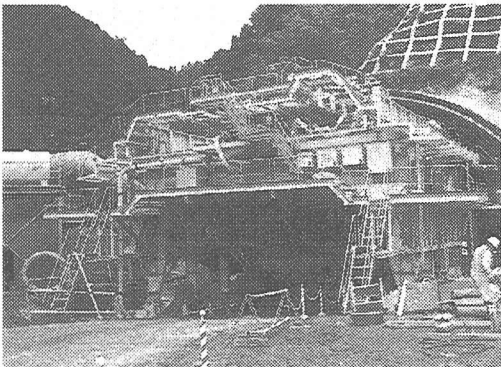


図-2 セントル組立て状況

パン (1 スパン $L=10.5\text{m}$) 繊維補強覆工コンクリートを2スパンの合計 7 スパンの試験打設を行った。調査は通常コンクリートの3スパンを含めた10スパンの打設状況調査と品質確認調査として1スパンの坑口側と切羽側の2断面で天端部、肩部及び側壁部でコアボーリングを行い圧縮強度試験を行った。また、打設終了後に10スパンのコンクリートの充填状況を確認するために、電磁波を用いた覆工背面レーダー探査をトンネル縦断方向に天端部と両肩部の3測線と横断方向を各種コンクリートで1測線づつ行い覆工の巻厚と空洞の有無の確認を行った。

表-3 打設状況表

コンクリートの種類	スパン	実績打込量 (m³)	平均打込量 (m³)	打込時間 (hr)	平均打込時間 (hr)	打込速度 (m³/hr)	平均打込 (m³/hr)	打込み状況
高強度	23	180	184.5	6.72	6.79	26.8 (28.3)	27.1 (28.3)	打込みは順調に行われた。
	24	180		6.05		29.8 (29.8)		
	25	189		6.87		27.5 (29.7)		
	26	202.5		7.27		26.9 (29.0)		
	27	171		7.05		24.3 (24.9)		
繊維補強高強度	28	175.5	177.8	8.5	8.44	20.6 (21.7)	21.1 (22.0)	・コンクリートがマッシュ上にコンクリートが滞留し、常に人力で掻き落とす必要があった。 ・側壁部打ち込み時、左右分岐管部で閉塞が発生したが左右交互の圧送方式に変更し対処が出来た。 ・ポンプの変更によりマッシュの目開きは大きくなったがマッシュ上にコンクリートが滞留し、常に人力で掻き落とす必要があった。 ・側壁部の打ち込みは左右交互に圧送した結果、閉塞はほとんど生じなかった。 ・圧送能力の大きいポンプに変更したことによりポンプ負荷は軽減して圧送性の問題はなくなった。
	29	180		8.38		21.5 (22.3)		
通常	30	182.5	184.8	8.15	7.59	22.4 (26.7)	24.4 (29.3)	打込みは順調に行われた。
	31	198		7.63		26.0 (28.1)		
	32	174		6.98		24.9 (32.9)		

() …生ワチ待ちなどのロス時間を除いた実打設時間

4. 2 試験施工結果

4. 2. 1 打設状況調査

打設状況の調査結果 (表-3) より以下のことが確認された。

① 高強度コンクリートの打設は、平均打込み速度が通常コンクリートの $29.3\text{m}^3/\text{hr}$ に対して $28.3\text{m}^3/\text{hr}$ とほぼ同じであり配管の詰まり等、施工時のトラブルも無いことから施工性については問題が無いことが確認された。

② 繊維補強コンクリートについては、側壁部の打込み時に左右分岐部で鋼繊維による閉塞が発生したため配管の分岐部での閉塞を予防するために左右交互の打込みを実施する必要があった。また圧送負荷が大きくなったために能力の高いポンプ

(定置式ポンプ:ピストン圧力 4.34MPa →コンクリートポンプ車:ピストン圧力 6.5MPa) を使用することになった。これらは今回使用した鋼繊維の長さが 60mm と長いことが、配管閉塞の原因となる繊維の絡み合いや圧送負荷を上げる原因になったと考えられる。

③ 現在 10.5m のセントルを使用して施工を行っているが、繊維補強コンクリートについては今回の調査結果から平均打込み時間が8時間半以上かかっており、現地状況によって 12.5m のセントルを使用する場合は、施工時間が10時間以上かかると予想され、現在の施工設備では鋼繊維長 60mm での施工は厳しいと考えられる。

4. 2. 2 品質調査試験

コアボーリングによる圧縮強度試験結果 (表-4) より以下のことが確認された。

① 高強度・繊維補強高強度及び通常コンクリートはすべて設計基準強度の $30\text{N}/\text{mm}^2$ ・ $18\text{N}/\text{mm}^2$ を満足することが確認された。

③ 側壁部・肩部・天端部の断面内のコ

ア採取箇所による強度の傾向は特にみられなかったが、高強度コンクリートは切羽側よりも坑口側のコア強度の方が $8\sim 9\%$ 圧縮強度が高い結果となった。これは10スパン全て注入圧力を現場ポンプでセントルの仕様である

表-4 材齢28日コア強度 (単位: N/mm^2)

		高強度コンクリート				繊維補強高強度コンクリート	通常コンクリート			
		26 N/mm ²		27 N/mm ²		29 N/mm ²	30 N/mm ²		31 N/mm ²	
		坑口側	切羽側	坑口側	切羽側	切羽側	坑口側	切羽側	坑口側	切羽側
コア ボリ ング	側壁部	35.6	31.7	38.0	34.0	31.7	29.2	26.3	-	-
	肩 部	34.0	30.2	35.3	32.7	30.4	24.8	27.3	-	26.1
	天端部	35.4	34.3	32.6	31.7	35.7	24.8	28.8	27.5	28.2
	平 均	35.0	32.1	35.3	32.8	32.6	26.3	27.5	27.5	27.2
	全体平均	33.6		34.1		32.6	26.9		27.3	
	目標強度	34.8					25.7			
標準養生平均		38.3		39.1		37.9	27.9		27.9	
設計基準強度		30					18			

50kPa 近くまでかけたが、高強度コンクリートは骨材寸法が通常コンクリートの 40 mm に対して 25 mm と小さくセメント量も多いため流動性がよく注入口のある坑口側に圧力が良く伝わった結果と考えられる。

④ 高強度コンクリートは標準養生の平均強度より 10～15% 強度が下がっているが、これはコアボーリングを行うことによる強度の低下であると考えられる。文献²⁾によると切断トルクが 1.8kg・m より高い場合（今回は 4.1 ないしは 4.9kg・m 程度）は 10% 程度の強度低下があることが示されている。通常コンクリートに強度の低下がみられないのは骨材の最大寸法（ $G_{max}=40\text{mm}$ ）による影響と考えられる。

⑤ 通常コンクリートの圧縮強度はコアボーリング全体の平均強度と標準養生の平均強度の差が小さいことから吹上げ方式という打設法による強度の低下はほとんど無いと考えられる。

⑥ 覆工表面については図-3 のように施工が入念に行われていることもあり各種コンクリートとも非常にきれいな仕上がりとなった。

4. 2. 3 覆工背面レーダー探査結果

天端部・両肩部の縦断方向及び横断方向の覆工背面レーダー探査結果は、通常コンクリート、高強度コンクリート区間は巻厚不足・背面空洞は確認されなかった。また、繊維補強コンクリート区間は電磁波が鋼繊維に影響を受けて測定精度が落ちて判然としないが施工状況調査から巻厚不足・背面空洞は無いものと考えられる。

4. 3 まとめと今後の課題

今回の試験施工より、高強度覆工コンクリートは通常コンクリートと比べて遜色なく施工でき、充填状況や品質的にも問題が無いということが確認されたが、鋼繊維補強高強度覆工コンクリートについては繊維長さが 60 mm だと、現在の打設システムのままでは施工性が通常コンクリートに比べて悪く検討の必要が確認された。

今後さらなる実トンネルでの試験施工を行うにあたっての課題として

- ① 今回の試験施工は、高強度コンクリートの設計厚さを通常コンクリート施工時の 50 cm で施工を行っているため設計厚さを薄くして（ $t=50\text{ cm} \rightarrow t=40\text{ cm}$ ）試験施工を行い薄肉化した場合の施工性や品質及び充填状況の確認。
- ② 高強度コンクリートの試験結果より注入圧力の効果が確認されたため現地試験における注入圧力とコンクリート強度の関係の確認を行い、注入圧力を考慮した施工方法の確立。
- ③ 鋼繊維補強高強度覆工コンクリートの施工性を改善するために繊維長さ及びポンプ、配管等のシステムの検討。
- ④ 作業員が非常に狭いセトル内で作業（図-3）を行わなければならない施工性の問題点の改善として高流動コンクリート（自己充填式コンクリート）適用の検討。

が項目としてあげられる。

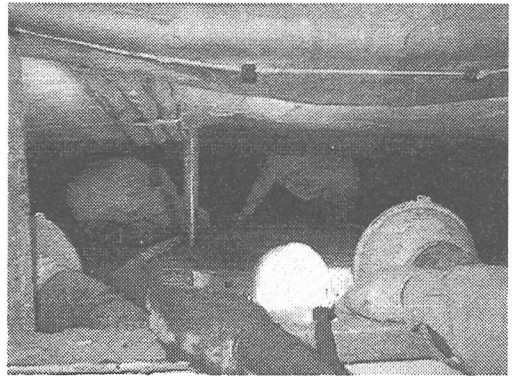


図-3 打設作業状況

参考文献

- 1) 日本道路公団：第二東名・名神高速道路トンネル設計指針（案）P.69 平成 11 年 7 月
- 2) 毛利虎雄、平賀友晃、倉林清、荒巻哲生：コンクリート構造物のコア採取方法と強度について、セメント・コンクリート No. 373 p22～29 Mar. 1978